

文章编号: 1001-3806(2005)03-0284-03

GaN 基激光器光增益和内部光损耗的测量

金春来^{1,2}, 胡晓东^{1,2*}, 王琦^{1,2}, 张振生^{1,2}, 章蓓^{1,2}

(1. 北京大学 物理学院 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学 宽禁带半导体研究中心, 北京 100871)

摘要: 采用变条长方法实验测量了 GaN 基短波长激光器样品的放大自发发射谱, 确定了样品的光增益和光损失系数, 并发现了样品中存在着严重的光增益饱和的现象。证实了变条长方法对于研究 GaN 基短波长激光器性能的可行性。进一步比较了两种不同结构的激光器样品在增益和增益饱和方面的性能差别, 同时指出样品外延时生成的裂纹, 可能是造成这一差别的原因。

关键词: 放大的自发发射谱; 变条长方法; 光损耗; 光增益; 增益饱和

中图分类号: TN 248.4 **文献标识码:** A

Measurement of optical gain and optical internal loss in GaN-based laser

JIN Chun-lai^{1,2}, HUXiao-dong^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, ZHANG Zhen-sheng^{1,2}, ZHANG Bei^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Artificial Microstructure and Mesoscopic Physics, Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Research Center for Wide Gap Semiconductors, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract To assess the performance of a semiconductor laser, knowledge of gain and loss at a known pumping level is essential. Both the gain and the loss coefficients were obtained through analyzing amplified spontaneous emission (ASE) measured with variable stripe length (VSL) method, and serious gain saturation phenomenon was observed in the process. The results confirm the feasibility of the VSL method in studying the performance of GaN LD samples. Performance of LDs with two different structures in gain and gain saturation were compared through VSL method, and the reason that leads to the difference was discussed.

Key words amplified spontaneous emission; variable stripe length method; optical loss; optical gain; gain saturation

引 言

蓝紫光 GaN 基激光器是迄今为止半导体激光器中波长最短的可见光激光器, 可以成倍地提高光存储密度, 达到 1 Gbit/cm² 以上, 是下一代高密度光存取 (DVD) 系统必不可少的核心有源器件, 具有巨大的市场前景, 受到广泛的关注。早在 1996 年, 日本日亚公司在世界上率先实现了 GaN 基紫光 LD 在电注入下的激射。我国目前在这一领域的研究工作才刚刚起步, 至今还没有实现激射的报道。

笔者在研的 GaN 基激光器采用 F-P 谐振腔结构, 腔内光损耗 α 和腔镜面反射率直接决定了激光器阈值增益, 反映了激射时应达到的目标增益水平。而在同一注入电流密度下, 不同激光器结构管芯的光净增

益的大小, 则可以作为比较不同结构管芯性能优劣的一个重要指标。因此, 分析和确定激光器管芯的光净增益 G 、光损耗 α 等性能参数, 评估实现激射的阈值对研制 GaN 基激光器是至关重要的。在实现激射后, 这些参数也是进一步改进激光器性能的重要依据。

1 基本原理

光增益可以通过分析受激发射的纵向模式来确定, 即所谓的 H-P 方法 (Hakki-Paoli technique); 也可以靠转换自发发射谱 (Henry 方法); 或者通过分析放大的自发发射谱 (amplified spontaneous emission, ASE) 随通电电极长度的变化来获得^[1]。H-P 方法需要分辨纵模, 对实验仪器的谱分辨率要求很高, 而且只有在实现受激发射的情况下才能适用。而 Henry 方法要使用一种非直接的办法去计算出费米能级分裂, 而不是直接给出绝对单位的光增益。

本文中采用变条长方法 (VSL) 研究 GaN 基短波长激光器结构的性能参数, 通过分析 ASE^[2] 来获得 GaN 基激光器结构的光损耗和光增益。这种方法使用的是一个具有分区电极的样品。样品电极结构见图 1。样品的电极上有多个等长的块电极作为各自独立

基金项目: 国家八六三计划资助项目 (2001AA313110); 国家自然科学基金资助项目 (60276010); 北京市科技计划资助项目 (H030430020230)

作者简介: 金春来 (1980), 男, 硕士, 现从事半导体光电子方面的研究。

* 通讯联系人。Email: huxd@pku.edu.cn

收稿日期: 2004-05-08; 收到修改稿日期: 2004-06-01

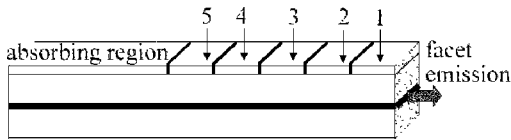


Fig. 1 Schematic diagram of the multisection device for electrically pumped VSL method

的注入电极区。测量时,第 1 次给电极 1 加电流,从前端面测量出射的 ASE 谱,第 2 次给电极 1, 2 加电流,第 3 次给电极 1, 2, 3 加电流,第 4 次给电极 1, 2, 3, 4 加电流,测得的 ASE 谱分别记作 $I_L, I_{2L}, I_{3L}, I_{4L}$ 。这相当于改变增益介质长度,测量出射的 ASE 谱。为了保证每次测得的 ASE 谱只在激光器 F-P 腔中单程传输便出射,而不是经过端面的两个腔镜面来回反射,样品电极区的后面还有一段较长的区域专门用作吸收区。将各次测得的 ASE 谱按照下式来拟合,便可定出增益 G 的值:

$$I_{ASE} = I_{sp} (e^{GL} - 1) / G \quad (1)$$

式中, I_{ASE} 是放大的自发发射谱强度, I_{sp} 是自发发射谱强度, L 是距离出射端面的长度。BLOOD^[3] 建议可以只利用 I_L 和 I_{2L} 来获得 G , 本文中采取此方法。其计算公式为:

$$G = [\ln(I_{2L}/I_L - 1)] / L \quad (2)$$

净增益谱在长波边应趋于一个常数,这一数值即是内部光损耗 α 。通过测量不同注入电流密度下的净增益谱,能够由光增益谱的长波边来确定内部光损耗 α 。由于内部光损耗 α 由外延片本身结构决定,而不受注入电流影响,因此不同注入电流密度下的净增益谱在长波边应趋于一个常数。这一结果在测量中得到了验证。

实现 F-P 腔激光器激射的阈值增益条件由光损耗系数和镜面损耗共同决定,下式是三者的相互关系:

$$G_{th} = \alpha + [\ln(1/R)] / L \quad (3)$$

式中, G_{th} 是激光器的激射的阈值增益, L 为激光器的腔长, R 是腔面反射率,在没有蒸镀反射镜的情况下, R 由激光器的折射率 n 决定, $R = [(1-n)/(1+n)]^2$ 。

2 实验及结果

考察了两种不同外延结构的样品。样品 A 和样品 B 都是通过金属有机化合物气相沉积法 (MOCVD) 在蓝宝石衬底上外延生长的 GaN 基激光器结构。样品 A 从衬底到顶层依次生长: 2.5 μm 的 n 型 GaN 接触层,多周期的 n 型 Al_{0.12}GaN/GaN 超晶格限制层,每个周期 Al_{0.12}GaN/GaN 和 GaN 层的厚度均为 2.5 nm, n 型 GaN 光波导层,5 个周期的 In_{0.07}GaN/GaN 量子阱,每个周期中 InGaN 厚度为 3 nm, GaN 厚度为 8 nm, p 型 AlGaN 电子阻挡层, p 型 GaN 光波导层,多周期的 p 型 Al_{0.12}GaN/GaN 超晶格限制层,每个周期 Al_{0.12}GaN 和 GaN 层的厚度均为 2.5 nm, p 型接触层。

样品 B 与样品 A 的外延结构基本相同,只是样品

B 的量子阱中 In 组分的 x 值为 0.11,超晶格中 Al 组分的 x 值为 0.18。

两种样品都被制成氧化物条形结构,条宽 8 μm ,条长 1800 μm , p 电极和 n 电极分别为 Ni/Au 和 Ti/Al/Au。用化学腐蚀的方法从样品出光端面开始腐蚀出两个 300 μm 长的相邻电极,余下的 1200 μm 长的区域作为吸收区,然后样品被粘接在铜质热沉上。为减少热效应,测试使用的是脉冲电源,占空比为 4%。

图 2 中给出了样品 A 在 1.67 kA/cm² 的注入电流密度下,给电极 1 通电,在出射端面测得的 ASE 谱 I_L ,给电极 1 和 2 同时通电测得的 ASE 谱 I_{2L} 。利用这组结果,根据 (2) 式就可以计算出在这一电流密度下的样品 A 净增益谱 G 。

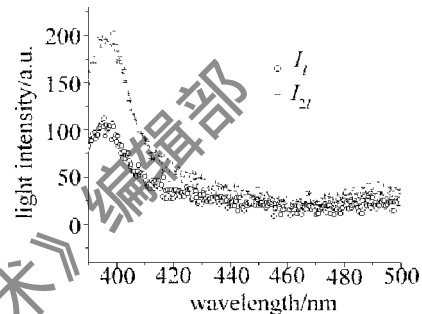


Fig. 2 ASE spectra for stripe lengths of L and $2L$

图 3 中的一组曲线反映了样品 A 随注入电流密度增加,净增益谱随波长的变化。从中可以看到净增益随注入电流密度增加而增加的正常趋势,另外还可以看到随注入电流密度增加,净增益谱峰值会产生红移。但是,不同注入电流密度下的净增益谱在长波边都趋于一个值,不受注入电流的影响,这正是样品的内部光损耗 α 它是由外延片本身结构决定,与注入电流无关,由此可确定样品 A 中的内部光损耗 $\alpha = 32 \text{ cm}^{-1}$ 。

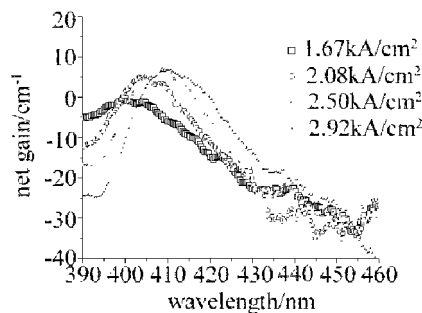


Fig. 3 Netmodal gain spectra of LD(A) for different electric current densities

运用 (3) 式,可以进一步算出对于样品 A 结构的激光器,当腔长为 600 μm 时实现激射至少需要达到 46 cm^{-1} 的光增益水平。

在相同注入电流密度的条件下分别测量了 A, B 两种样品的 ASE 谱,按照上述同样的方法计算了各自的净增益谱线,结果如图 4 所示,实验中的电流密度值为 2.08 kA/cm²。从中可以看到两种样品在长波边的

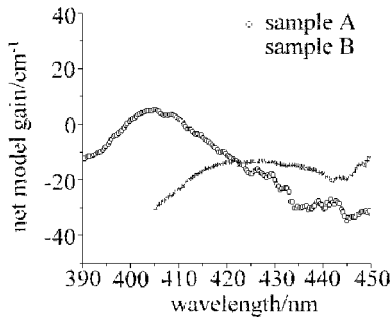


Fig 4 Net modal gain spectra of LD(A) and LD(B)

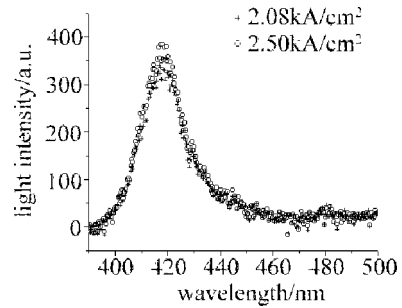


Fig 6 ASE spectra of LD(B) for stripe lengths of L and $2L$ at the electric current density of saturation

光增益值不同,表明它们各自具有不同的光损耗,样品 A 的光增益谱的长波边吸收系数的绝对值比样品 B 的要大,因此其光损耗更大。样品 A 的限制层中 Al 组分更低,使得限制层的折射率与有源层折射率之间的差别更小,因此,样品 A 的光限制因子不及样品 B。PDNEER^[3]认为从有源区泄漏的光在缓冲 (buffer) 层附近会被强烈吸收,因此,限制因子越小泄漏到缓冲层的光越多,样品的光损耗就会更大,故 A 的光损耗 α 比 B 的大是一个合理的结果。但是,从该图中看到在相同的注入电流密度下,样品 A 的光增益谱的峰值比样品 B 大,因此,样品 A 的光增益明显好于样品 B。样品 A 的限制因子小,光损耗大,但光增益却更好,这似乎是矛盾的。由净增益公式: $G = \Gamma g - \alpha$ 式中, Γ 是光限制因子, g 是材料的点增益。净增益 G 还与点增益有关,笔者的实验结果说明样品 A 和 B 的点增益 g 是不同的,样品 A 的点增益更大,因此,即便样品 A 的限制因子小,光损耗大,但是光增益仍然更大。

另外在测试过程中还发现,两种样品都存在增益饱和问题,即当电流密度升高到一定程度,再增加电流增益也不再增加的现象。图 5 是样品 A 增益饱和和电流密度附近的净增益谱。从中可以看到,自 3.33 kA/cm^2 开始,随电流密度增加净增益不但不增加而且已经有略微的降低。

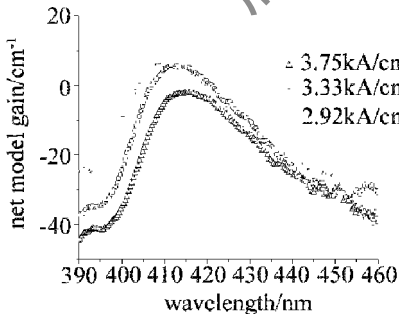


Fig 5 Net modal gain spectra of LD(A) for electric current densities near saturation

图 6 是样品 B 在电流密度为 2.08 kA/cm^2 时的 ASE 谱 I_L 和 I_{2L} , 可以看到二者几乎相等,说明已经出

现增益饱和现象。由此看到,样品 A 的饱和电流更高。样品 B 在增益能力和饱和性能上都不及样品 A。很可能与样品外延生长过程中生成的裂纹有关。在超晶格的外延过程中,掺 Al 组分的增加会使样品中应力增大,容易生成裂纹。图 7a 图 7b 分别是样品 A 和样品 B 在没有制备激光器时的光学显微镜表面形貌照片。可以看到样品 B 的表面有很多明显的裂纹。样品镀电极时金属颗粒可能会落到这些裂纹中,且电压较高时,裂纹处容易造成漏电流,这些都可能是造成样品 B 的 g 减小和光强易饱和的原因。

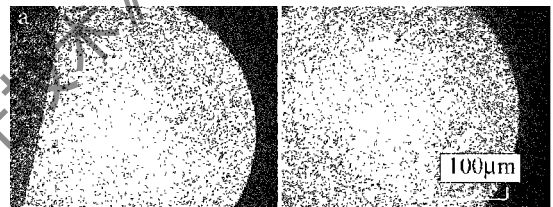


Fig 7 Optical micrograph
a— surface of sample A b— surface of sample B

3 结 论

用 VSL 方法分析 ASE 谱获得了反映激光器样品性能的两个重要参数:内部光损耗和光场净增益,并且通过内部光损耗计算出了激射的阈值增益大小。比较了两种不同结构的激光器样品在增益能力和饱和电流上的性能优劣,并初步分析了原因。

参 考 文 献

- [1] OSTER A, ERBERT G, WENZEL H. Gain spectra measurements by a variable stripe length method with current injection [J]. Electron Lett 1997, 33(10): 864~866
- [2] THOMSON JD, SUMMERSH D, HULYER P J *et al* Determination of single-pass optical gain and internal loss using a multisection device [J]. A P L, 1999, 75(17): 2527~2529
- [3] KMURA Y, ITO A, MIYACHIM *et al* Optical gain and optical internal loss of GaN-based laser diodes measured by variable stripe length method with laser processing [J]. Japan J A P, 2001, 40: L1103~L1106.